

8

Mudanças do clima e a cultura do eucalipto

Eduardo Delgado Assad
José Eduardo Boffino de Almeida Monteiro
Vanessa Silva Pugliero



Introdução

Bases físicas do aquecimento global

Para um conhecimento mais detalhado dos efeitos e consequências das mudanças do clima, é preciso saber a diferença clássica entre tempo e clima. Isso porque um dos questionamentos muito utilizados pelos céticos do aquecimento global e consequentes mudanças do clima é, “se está frio - normalmente no inverno - onde está o aquecimento global? Como a temperatura está subindo se tempestades de neve ainda ocorrem em várias partes do mundo?” Daí a importância da definição de:

- Tempo: É o estado da atmosfera num determinado momento e num determinado lugar. O tempo, portanto, muda todos os dias. É o objeto de estudo dos meteorologistas.
- Clima: É uma síntese do tempo descrito em termos médios em um determinado lugar durante um período de 30 anos. Estudo paleoclimáticos (Cronin, 2010), demonstram que mudanças no clima já ocorreram no passado, mas muito lentamente, ao longo de séculos e milênios. O clima, portanto, em condições normais, não se altera em uma escala temporal de anos ou décadas. É o objeto de estudo dos climatologistas.

O que estamos verificando hoje é que, mesmo considerando as variações interanuais, ou mesmo decadais que podem ocorrer nas condições do tempo em um dado local, nos últimos 100 anos, observa-se um aumento consistente e continuado da temperatura no planeta, identificado e relatado em dezenas de estudos científicos e utilizados em todos os relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), além de um forte aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEEs) na atmosfera, notadamente o CO_2 , que vem promovendo diretamente o aumento da temperatura (Figura 1).

A mudança é resultado da alteração na estabilidade das séries, o que provoca impactos num ambiente anteriormente estável. Dependendo do período de observação, pode-se confundir mudança com variabilidade. Na Figura 2, os exemplos de mudança e variabilidade são ilustrados, considerando a escala temporal.

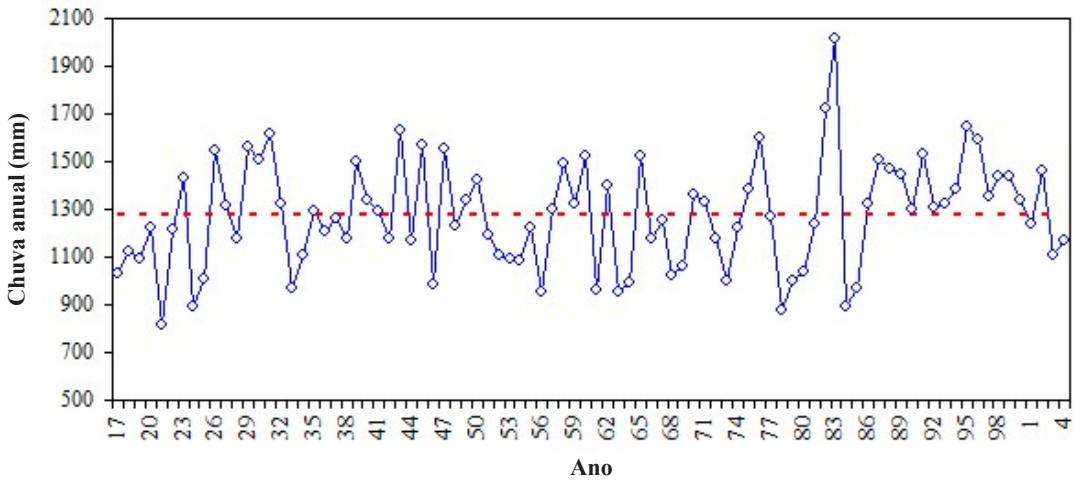


Figura 1. Relação entre mudança e variabilidade climática. Variabilidade climática refere-se às flutuações em torno da média, ao longo de um período.

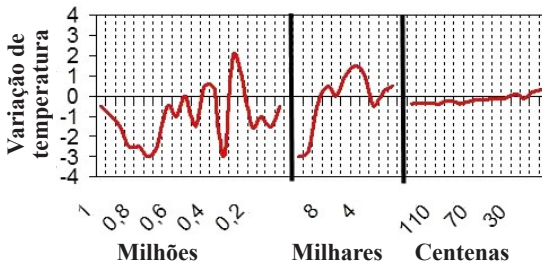


Figura 2. Variação da temperatura global da Terra no último milhão de anos em relação à condição atual.

Ou seja, no último milhão de anos observa-se uma variabilidade da temperatura em torno da média. Nos últimos milhares de anos observa-se alteração climática mais acentuada e, nos últimos cem anos, um aumento de temperatura com tendência de alta, caracterizando uma mudança. É importante ressaltar que, há milhões de anos, já ocorreram aumentos de temperaturas iguais ou superiores a 2 °C, quando o *Homo sapiens* ainda não existia. A espécie surgiu há cerca de 350 mil anos na região Leste da África e adquiriu o comportamento moderno de assentamentos fixos baseados em práticas agrícolas primitivas há cerca de 12 mil anos. Neste período, o homem jamais vivenciou variação climática na intensidade que vem ocorrendo nas últimas décadas.

Na Tabela 1 é apresentado um breve histórico da evolução dos estudos e preocupações do homem com relação às mudanças do clima.

Tabela 1. Breve histórico da evolução dos estudos e preocupações com relação às mudanças do clima.

Ano	Acontecimento
1824	O francês Jean Baptiste Fourier descreve o “efeito estufa” natural do planeta Terra e estima que o planeta seria muito mais frio se não existisse a atmosfera
1859	O irlandês John Tyndall descobre que alguns gases, como CO ₂ e o metano, aprisionam a radiação infravermelha, criando o Efeito Estufa
1896	Svante Arrhenius calcula que a temperatura da Terra aumentaria 5 °C com o dobro de CO ₂ na atmosfera
1958	Charles Keeling monta uma estação de medições de CO ₂ no alto do monte Mauna Loa, no Havaí, e descobre que as concentrações de gases na atmosfera estão crescendo
1968	Estudos sugerem a possibilidade de um colapso das geleiras polares e de um aumento catastrófico no nível do mar
1988	O climatologista James Hansen da Nasa depõe no Senado dos EUA e diz ter certeza que o aquecimento global será catastrófico
1988	Criado o IPCC
1992	Acordada no Rio de Janeiro a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança climática, com o objetivo de evitar a “interferência perigosa” dos humanos no clima
1997	Protocolo de Kyoto aprovado na COP 3
2001	Relatório do IPCC prevê aumento de 1,4 °C a 5,8 °C na temperatura da Terra até 2100
2005	O protocolo de Kyoto entra em vigor, sem a presença da Austrália e EUA. Furacão Katrina arrasa Nova Orleans
2007	O IPCC mostra que o aquecimento global é “inequívoco” e prevê aumento de 3 °C caso a concentração de CO ₂ dobre de valor
2009	Governos de 192 países do mundo se reúnem na cúpula do clima da ONU em Copenhague, com grandes expectativas de um novo acordo global, mas o resultado é píffio
2010	A cúpula da ONU no México não desmorona, como se temia, mas termina com acordos em questões pouco relevantes
2011	Dados mostram que as concentrações de gases de efeito estufa estão aumentando em um ritmo mais rápido do que nos anos anteriores
2012	O gelo no Ártico atinge uma extensão de 3.410.000 km ² , a menor área desde que as medições por satélite começaram, em 1979
2013	Dados do Observatório de Mauna Loa, no Havaí, informam que a concentração média diária de CO ₂ na atmosfera já ultrapassou 400 partes por milhão (ppm), pela primeira vez, desde que as medições começaram em 1958
2015	COP 21 - Acordo de Paris. 195 países concordaram em combater as mudanças climáticas e buscar um futuro com baixo carbono, resiliente e sustentável
2018	IPCC confirma importância da meta 1,5 °C. Um relatório especial sobre Aquecimento Global confirma a necessidade de manter o maior compromisso com os objetivos do Acordo de Paris

Fonte: Nações Unidas Brasil (2017); United Nations (2019).

A partir dessas descobertas e constatações, a ciência foi em busca de evidências com relação ao fenômeno global, (Cook, 2010):

Evidência 1: aumento da concentração de CO₂ na atmosfera.

Desde o início da revolução industrial é que se tem verificado o aumento da concentração de CO₂ na Atmosfera. Em 1958, na ilha de Mauna Loa, iniciou-se a medição diária desta concentração e, hoje, são quatro pontos de medição no globo terrestre que indicam o aumento desta concentração. Na Figura 3, é indicada como é a tendência do aumento de concentração de CO₂.

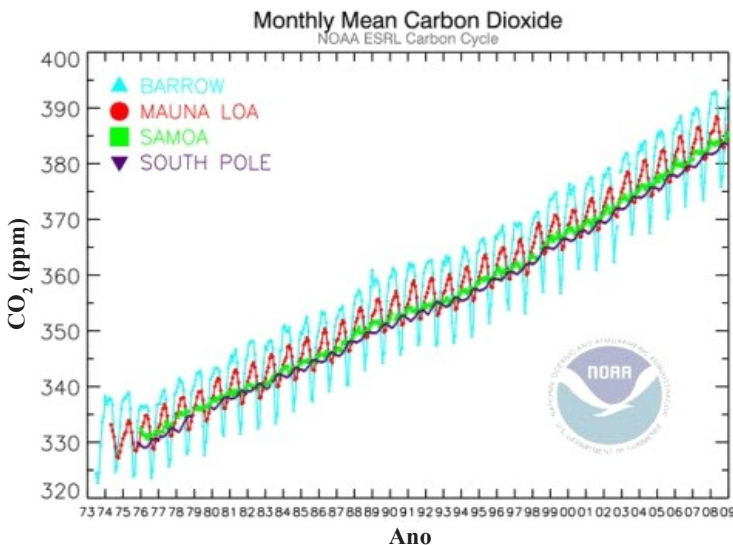


Figura 3. Aumento da concentração de CO₂ em quatro pontos da Terra entre 1973 e 2009. Situação em Julho de 2019, 411ppm.

Fonte: CO1 (2020).

Evidência 2: a marca dos combustíveis fósseis no ar e nos corais

Há diferentes tipos de carbono no ar, conhecidos como isótopos de carbono. O tipo mais comum é o carbono-12, mais leve e preferido pelas plantas. Combustíveis fósseis como carvão ou petróleo vêm de plantas que viveram há milhões de anos. Então, quando são queimados, são emitidos mais deste carbono-12 leve, o que deve causar a queda da relação entre o carbono-13. Isso é o que se observa em medições na atmosfera, corais e esponjas marinhas. Esta é uma evidência forte de que o aumento do dióxido de carbono no ar está diretamente ligado às emissões humanas (Figura 4).

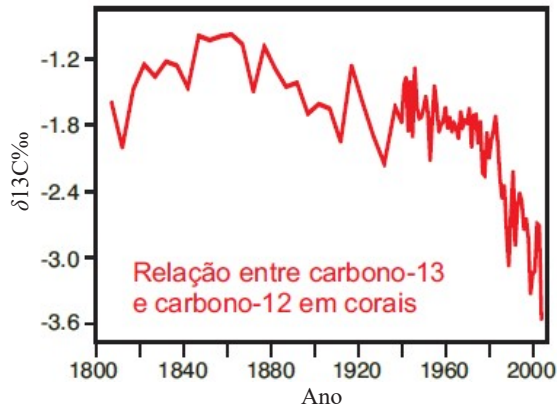


Figura 4. Medições (relação entre o carbono-13 e o carbono-12) feitas na Grande Barreira de Corais. Fonte: Cook (2010).

Evidência 3: menor perda de calor do planeta e atmosfera para o espaço

Satélites medem a radiação infravermelha que sai para o espaço, observando assim com clareza o efeito estufa aumentando nas últimas décadas. Uma comparação entre os dados dos satélites de 1970 e 1996 mostrou que há menos energia escapando para o espaço nos comprimentos de onda em que os gases estufa absorvem energia (Figura 5).

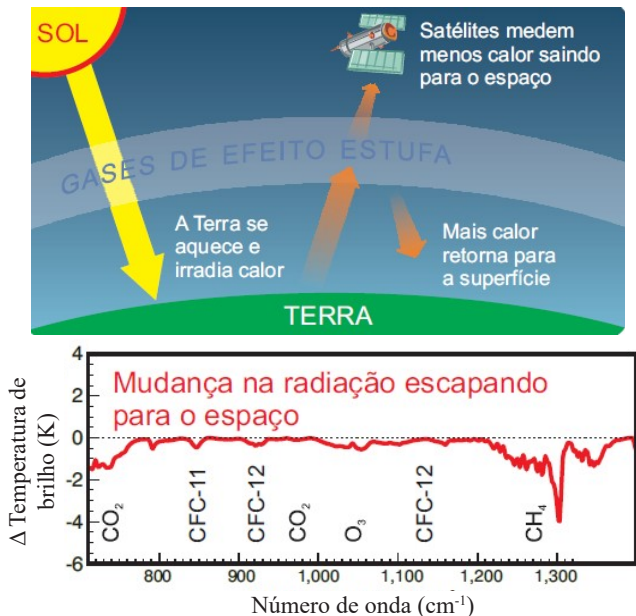


Figura 5. Menos radiação escapando para o espaço. Fonte: Cook (2010).

As bases físicas do aquecimento global resultante do aumento das concentrações de dióxido de carbono antrópico na camada atmosférica estão amplamente discutidas e demonstradas na literatura científica (Ciais et al., 2013). Apesar dos céticos do aquecimento global, atualmente, estudantes de nível médio reproduzem ensaios experimentais simples demonstrando a relação direta entre efeito estufa e o aumento da concentração de CO_2 .

Evidência 5: o padrão de aquecimento dos oceanos

Os oceanos em todo o mundo têm acumulado calor pelos últimos 40 anos. O padrão que se observa no aquecimento dos oceanos pode apenas ser explicado pelo aquecimento por efeito estufa (Figura 6).

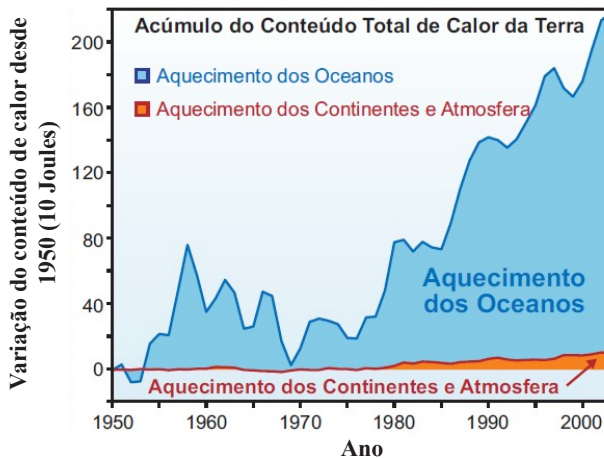


Figura 6. Padrão de aquecimento dos oceanos.

Fonte: Cook (2010)

Evidência 6: noites mais quentes do que os dias

Um efeito estufa mais intenso implica em aumentos de temperatura maiores durante as noites do que ao dia. Durante o dia, o sol aquece a superfície da Terra. À noite, a superfície se resfria irradiando calor para o espaço. Os gases de efeito estufa tornam esse processo mais lento. Se o aquecimento fosse causado pelo sol, ter-se-ia uma tendência mais forte de aquecimento durante o dia. Ao invés disso, o que se observa é o número de noites quentes aumentando mais rápido que o número de dias quentes (Figura 7).

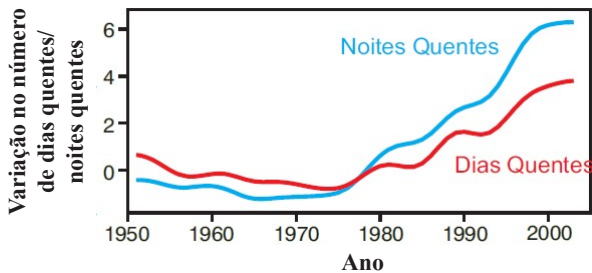


Figura 7. Variação no longo prazo do número anual de dias quentes (vermelho) e noites quentes (azul). Quente é definido aqui como os 10% mais quentes do período estudado.

Fonte: Cook (2010).

Existem outras diversas evidências como o aumento do nível dos mares, a retenção de calor na atmosfera baixa, aquecimento maior no inverno do que no verão, enfim, situações medidas e provadas cientificamente de que a Terra está se aquecendo.

Impactos das mudanças do clima no Brasil

Em Brasil (2016b), a partir de análises dos modelos do IPCC (AR5), foi fornecido um quadro geral dos impactos no Brasil, utilizando um cenário pessimista e outro otimista. O cenário pessimista é referente ao RCP8.5 do IPCC e o cenário otimista é referente ao RCP2.6 do IPCC (Figura 8).

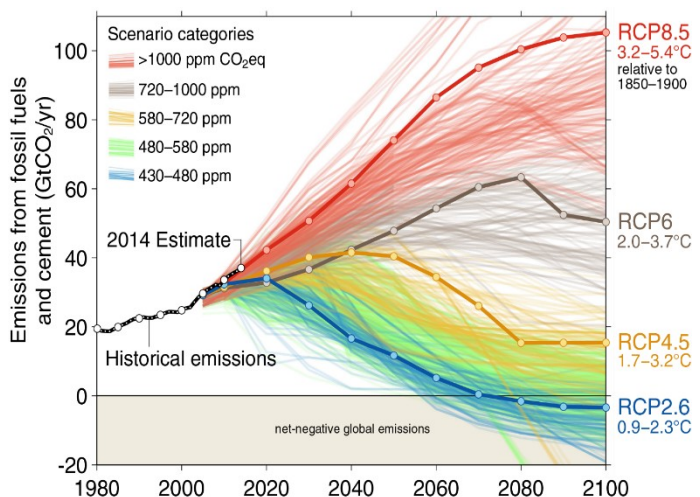


Figura 8. Cenários do IPCC em função da variação futura de concentração de CO₂.

Fonte: Edenhofer et al. (2014).

Os chamados RCPs (Representative Concentration Pathways) servem como entrada para a modelagem climática e química atmosférica nos experimentos numéricos do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5). Os RCPs recebem seus nomes a partir dos níveis das forçantes radiativas, conforme relatado por cada equipe de modelagem elaboradora de cada RCP. Assim, RCP-X implica em um cenário no qual a forçante radiativa de estabilização em 2100 corresponde a $X \text{ W m}^{-2}$.

Neste sentido e seguindo estas métricas, as tendências futuras dos impactos do aquecimento global no Brasil seriam (Brasil, 2016b):

- Região Norte: Cenário pessimista é de 4 °C a 8 °C mais quente e 15% a 20% de redução de chuvas; Cenário otimista: 3 °C a 5 °C mais quente e 5% a 15% de redução de chuvas.
- Região Nordeste: Cenário pessimista é de 2 °C a 4 °C mais quente e 15% a 20% de redução de chuvas; Cenário otimista de 1 °C a 3 °C mais quente e 10% a 15% de redução de chuva.
- Região Centro-Oeste: Cenário pessimista é de 2 °C a 4 °C mais quente e aumento de chuvas intensas irregulares; Cenário otimista é de 1 °C a 3 °C mais quente e aumento de chuvas intensas irregulares.
- Região Sudeste: Cenário pessimista de 3 °C a 6 °C mais quente e aumento de chuvas intensas irregulares; Cenário otimista de 2 °C a 3 °C mais quente e aumento de chuvas intensas irregulares
- Região Sul: Cenário pessimista de 2 °C a 4 °C mais quente, 5% a 10% de aumento de chuvas intensas irregulares; Cenário otimista de 1 °C a 3 °C mais quente e 0% a 5% de aumento de chuvas intensas irregulares.

A quantidade de água no solo é uma variável fundamental para o crescimento da cobertura vegetal, seja natural ou agrícola. Em um determinado local, essa quantidade varia continuamente ao longo dos dias, meses e estações do ano, em função das condições meteorológicas e do tipo de cobertura vegetal sobre o solo (Dantas et al., 2007). O regime de chuvas, que determina a quantidade e a frequência da entrada de água no solo, e a evapotranspiração que determina a perda de água, são determinantes no resultado do balanço hídrico.

Uma forma de se estimar o conteúdo de água no solo é pela aplicação de modelos ou métodos de cálculo do balanço hídrico que, basicamente, contabilizam entradas e saídas de água no sistema ou solo considerado. O balanço hídrico fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM) (Camargo, 1971; Sentelhas et al., 1999; Pereira et al., 2002).

A aplicação do balanço hídrico em séries de dados meteorológicos dos últimos 30 anos permite a determinação do chamado “Baseline” ou Referência, que representa as condições atuais. E a aplicação do mesmo método em séries de dados corrigidos ou gerados para cenários futuros permite a comparação direta entre a condição do período base (“atual”) e cenários futuros. Utilizando um dos cenários futuros do IPCC, como o do modelo HDGEM2-ES, com a forçante RCP8.5, observa-se os seguintes impactos:

- Aumento da temperatura.
- Aumento da evapotranspiração potencial.
- Redução do excedente hídrico.
- Aumento da deficiência hídrica.

Analisando-se com maior detalhe os mapas da Figura 9, é possível verificar o aumento da deficiência hídrica em direção à região Centro-Oeste. Tal cenário poderá, no futuro, promover a redução na produtividade do eucalipto, uma vez que o incremento médio anual é diretamente afetado pela disponibilidade de água no solo. Deficiências anuais acima de 200 mm costumam indicar regiões limitantes para a produção dessa cultura.

Um dos maiores impactos do aquecimento global no Brasil é o aumento da deficiência hídrica ao longo dos anos. Cada tipo de cultura sofrerá um impacto diferente em função da diferenciação espaço-temporal da deficiência hídrica.

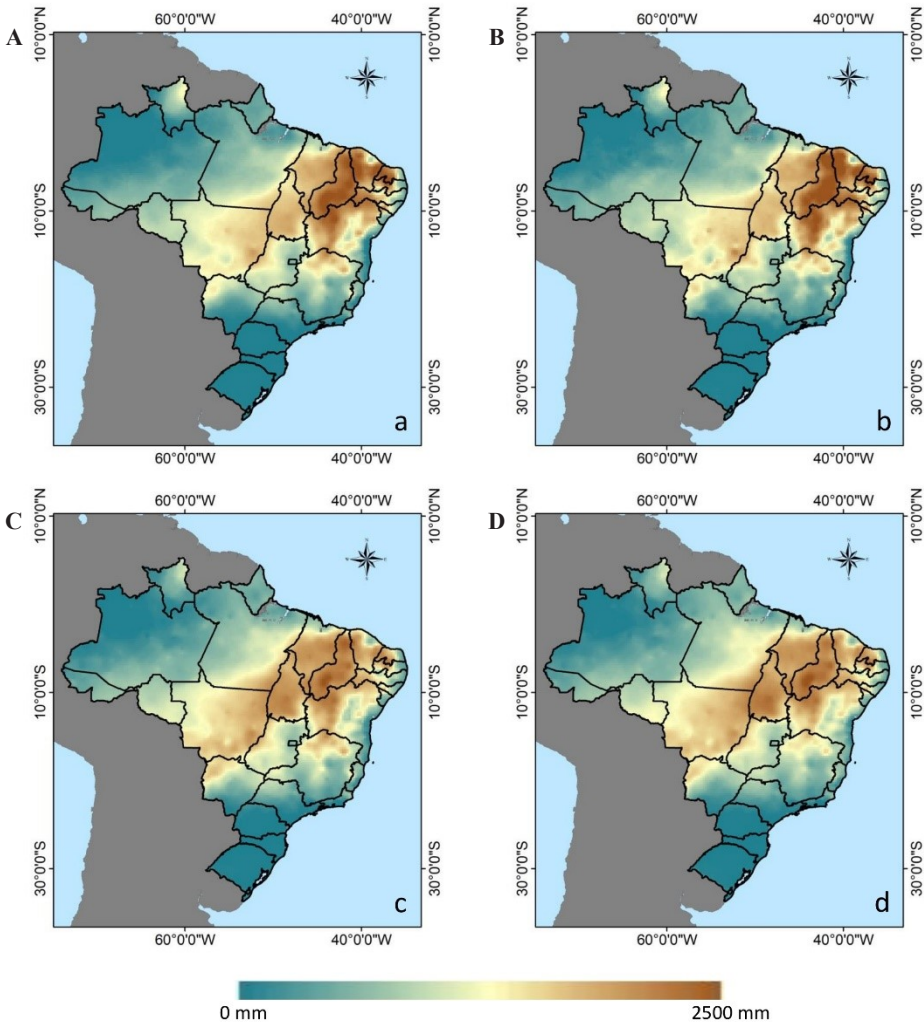


Figura 9. Mapa da deficiência hídrica, determinada pelo balanço hídrico climatológico, método de Thornthwaite, para os períodos A) 1986-2015, B) 2006-2015, C) 2021-2030, e D) 2031-2040.

Fonte: organizado pelos autores.

Os modelos globais

Modelos climáticos globais e regionais têm avançado nos últimos anos em termos da representação de processos e fenômenos críticos para estudo das mudanças climáticas globais, seus impactos sobre o Brasil e ações de mitigação. Parte do avanço vem do aumento da resolução espacial e parte da inclusão de controles climáticos

provenientes de novas componentes do sistema e da interação entre elas. O Brasil tem-se destacado nesta área, mediante o desenvolvimento de modelos atmosféricos globais e regionais, tais como os modelos atmosféricos globais.

Modelos de Circulação Geral (MCG) são modelos matemáticos de circulação geral da atmosfera planetária ou oceânica baseados nas equações de Navier-Stokes em uma esfera rotativa de fontes termodinâmicas. As equações diferenciais parciais não-lineares de Navier-Stokes são utilizadas para descrever o movimento turbulento dos fluidos e surgiram da aplicação da Segunda Lei de Newton ao movimento dos fluidos. Em suma, estabelecem que mudanças no momento e na aceleração de uma partícula fluida são simplesmente o produto das mudanças na pressão e forças viscosas dissipativas atuando dentro do fluido.

Juntamente com o gelo oceânico e os constituintes da superfície da Terra, são componentes fundamentais dos Modelos Climáticos Globais, os Modelos de Circulação Geral Atmosférica (MCGA) e os Modelos de Circulação Geral Oceânica (MCGO). Quando estes dois últimos são acoplados, geram um Modelo de Circulação Geral Acoplado (MCGA) ou Modelo de Circulação Geral Oceano-Atmosfera (MCGOA). Desta forma, quando outros pequenos modelos, como o de Gelo Oceânico ou Evapotranspiração são anexados, produz-se um Modelo Climático completo, muito utilizado para previsões de tempo, clima e projeções climáticas. Modelos que incluem componentes climáticos detalhados precisam de muitos recursos computacionais para produzir projeções para muitos anos no futuro, necessitando de equipamentos cada vez mais poderosos. Caso isso não seja possível, a alternativa é simplificar os cálculos realizados. Além disso, os modelos possuem limitações e incertezas que, de acordo com Kerr (2001), advêm dos modelos químicos, físicos e sociais.

Os modelos climáticos estão sendo submetidos a testes mais abrangentes, incluindo as avaliações das previsões em escalas de dias a um ano. Dessa forma, um conjunto diversificado de ensaios aumenta a confiança na fidelidade com que os modelos representam os processos que afetam as projeções do clima. Como exemplo, Hamada et al. (2008) e Ghini et al. (2011) agruparam 15 modelos climáticos globais, de acordo com a precipitação pluviométrica média em cada estação do ano, para a região Sudeste do Brasil com as anomalias do período de 2071-2100.

Os Modelos do CMIP5

Os dados provenientes do CMIP5 são resultantes de simulações de modelos globais de alguns Centros de Pesquisa que contribuem para a elaboração dos relatórios do IPCC, forçadas pelas concentrações observadas de GEE na atmosfera terrestre durante o século XX. Para cada modelo, são considerados diferentes membros, conforme disponibilizados pelo CMIP5 e relatados por Silveira et al. (2013).

Na Figura 10 é apresentado um esquema da evolução da modelagem climática desde 1990.

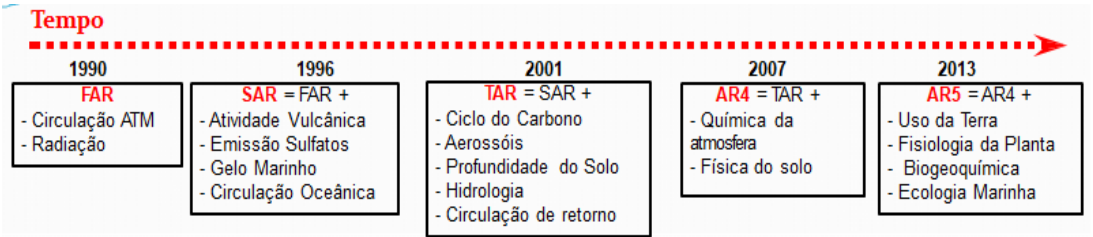


Figura 10. Avanços na modelagem climática. Adaptado de : Ciaís et al. (2013).

FAR: First Assessment Report; FAR: second assessment Report; TAR: Third Assessment Report.

Observa-se uma importante evolução no aperfeiçoamento dos modelos climáticos globais que indicam atualmente uma incerteza de 5% na estimativa da temperatura. Após uma exaustiva análise e comparação entre modelos, Silveira et al. (2013) concluíram que quatro modelos representam satisfatoriamente as condições brasileiras, sendo, portanto, recomendados para modelagens futuras do clima tropical brasileiro, conforme ilustrado na Figura 11.

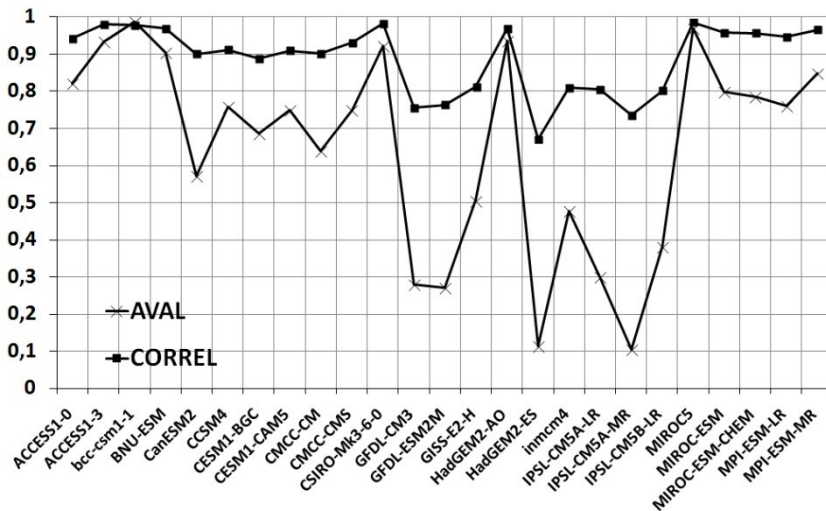


Figura 11. Análise da precipitação pluviométrica sazonal dos modelos do IPCC-AR5 para o século 20.

Fonte: Silveira et al. (2013).

Os modelos CCSMS, CISR)-MK3-6-0, Hadgem2-ES e o MIROC-ESM-LR são aqueles que apresentaram a melhor correlação entre os dados observados e os dados estimados pelos modelos. De uma maneira geral, o modelo mais utilizado no Brasil é o Hadgem2-ES e o ETA-HADGEM calibrado pelo INPE. Neste capítulo, todos os impactos das mudanças do clima no eucalipto foram calculados com as saídas do modelo HADGEM2-ES

Gases de efeito estufa

Como explicado anteriormente, o clima na Terra é regulado pelo fluxo constante de energia solar que atravessa a atmosfera na forma de luz visível. Parte dessa energia é devolvida pela Terra na forma de radiação infravermelha. Os GEEs são gases presentes na atmosfera terrestre que têm a propriedade de bloquear parte dessa radiação infravermelha. Muitos deles, tais como o vapor d'água, o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e o ozônio (O_3) existem naturalmente na atmosfera e são essenciais para a manutenção da vida, pois, sem eles, a Terra seria, em média, cerca de 30 °C mais fria.

Como consequência das atividades antrópicas na biosfera, o nível de concentração de alguns desses gases, como CO_2 , CH_4 e N_2O vem aumentando na atmosfera terrestre. Além disso, passou a ocorrer emissão de outros GEEs, compostos químicos produzidos somente pelo homem, tais como clorofluorcarbonos (CFCs), hidrofluorcarbonos (HFCs), hidrofluorclorocarbonos (HCFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6). Como estipulado pelo GHG Protocol, os GEEs a serem quantificados e reportados são:

- Dióxido de carbono (CO_2).
- Metano (CH_4).
- Óxido nitroso (N_2O).
- Hexafluoreto de enxofre (SF_6).
- Hidrofluorcarbonos (HFCs).
- Perfluorcarbonos (PFCs).
- Trifluoreto de Nitrogênio (NF_3).

Os cálculos devem incluir apenas as emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de GEEs não controlados pelo Protocolo de Montreal. Por isso, não se deve incluir os gases CFCs e os HCFCs que destroem a camada de ozônio, os quais já são controlados pelo Protocolo de Montreal.

Os GEEs cujas emissões antrópicas e remoções são tipicamente relacionados às atividades de uma cadeia agrícola, são o CO_2 , CH_4 e o N_2O . Outros gases como

o monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx) e outros compostos de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx) e outros compostos orgânicos voláteis não metânicos (NMVOC) são considerados gases precursores do efeito estufa, pois possuem influência nas reações químicas que ocorrem na atmosfera terrestre.

O dióxido de carbono equivalente (CO₂eq)

Dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) é uma métrica utilizada para equalizar as emissões de vários GEEs, com base na relativa importância de cada gás em relação ao CO₂, na produção de uma quantidade de energia (por área unitária), vários anos após um impulso de emissão. Para o cálculo do CO₂eq são utilizadas algumas conversões, sendo que a mais utilizada é o GWP (Global Warming Potential) proposto pelo IPCC. O Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (AR4) já examina métricas alternativas ao GWP e o Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5) aprofunda essa análise. Entre as métricas propostas apresentadas no AR4 está o Global Temperature Potential (GTP) (Tabela 2).

Os estudos e dados obtidos pela comunidade científica têm contribuído para a elaboração do inventário nacional de emissões de GEE, sob coordenação do Ministério de Ciência e Tecnologia (Brasil, 2016a).

O conhecimento do perfil de emissões de GEE ajuda a estabelecer estratégias, metas e planos para a redução e a gestão das emissões. A metodologia adotada para contabilizar essas emissões foi baseada em observações experimentais locais ou regionais durante períodos limitados do ano, que foram extrapoladas para todo o País. Resultados de emissão de GEE e suas incertezas são importantes para identificar e avaliar o perfil das fontes de emissões e também para projetar cenários futuros de emissões ou reduções das concentrações de GEE. As estimativas das emissões são necessárias para a análise de medidas mitigadoras dos efeitos do aquecimento global, sejam elas a escolha de tecnologias de controle, as avaliações de custos de abatimento ou as ponderações da participação de cada fonte e de cada país nas emissões globais.

A seguir, são detalhadas as principais fontes de emissão de GEE.

Tabela 2. Conversão de Emissões em GWP-100 e GTP-100.

Gas	GTP-100	GWP-100
CO ₂	1	1
CH ₄	5	25
N ₂ O	270	298
HFC-125	1.113	3.500
HFC-134a	55	1.300
HFC-143a	4.288	1.430
HFC-152a	0,1	124
CF ₄	10.052	7.390
C ₂ F ₆	22.468	12.200
SF ₆	40.935	22.800

GEE - Fontes de emissão

CO₂

- Mudança no uso do solo e desflorestamento.
- Queima de combustíveis fósseis (uso de combustíveis fósseis, principalmente pelos setores energético, industrial e de transportes).
- Emissões fugitivas (mineração de carvão, extração e transporte de petróleo e gás natural).
- Processos industriais (produção de cimento, cal, amônia, alumínio).

CH₄

- Mudança no uso do solo e desflorestamento.
- Queima de combustíveis fósseis (uso de combustíveis fósseis, principalmente, pelos setores energético, industrial e de transportes).
- Agropecuária (fermentação entérica, manejo de dejetos de animais, cultura de arroz, queima de resíduos agrícolas).
- Tratamento de resíduos (lixo e esgoto industrial e doméstico).
- Emissões fugitivas (mineração de carvão, extração e transporte de petróleo e gás natural).
- Processos industriais (indústria química).

N₂O

- Agropecuária (principalmente associado ao manejo de dejetos de animais, solos agrícolas, queima de resíduos agrícolas).
- Mudança no uso do solo e desflorestamento.
- Processos industriais (indústria química - produção de ácido nítrico e adípico).
- Tratamento de resíduos (esgoto doméstico).

HFC, PFC, SF

- Estes gases não existiam originalmente na natureza, sendo produzidos em processos industriais, principalmente no consumo em equipamentos de refrigeração e elétricos, e na produção de alumínio.

GEE Indireto

CO

- Queima de combustíveis fósseis (uso de combustíveis fósseis principalmente pelos setores energético, industrial, de transporte e residencial).
- Processos industriais (indústria química, indústria de alumínio e papel e celulose).
- Agropecuária (queimadas para a colheita de cana-de-açúcar).
- Queimadas em mudança no uso do solo e desflorestamento.

NO

- Queima de combustíveis fósseis (uso energético de combustíveis fósseis principalmente nos setores energético, industrial, de transporte e residencial).
- Processos industriais.
- Agropecuária (queima de resíduos de cana-de-açúcar e algodão).
- Queimadas em mudança no uso do solo e desflorestamento.

NMVOC

- Queima de combustíveis fósseis (uso energético de combustíveis fósseis principalmente nos setores energético, industrial, de transporte e residencial).
- Processos industriais (indústria química, de alumínio, papel e celulose, e de alimentos e bebidas).
- Uso de solventes.

Emissões de gases de efeito estufa no Brasil pela agropecuária

Informações e estimativas feitas pelo MCTI&C (Brasil 2016a), indicam que a maioria das emissões da agropecuária vem da fermentação entérica dos bovinos, seguida das emissões dos solos agrícolas, manejo dos dejetos agrícolas e do cultivo de arroz que, em 2017, totalizou 490 milhões de toneladas de CO₂ equivalente. Na Figura 12 são fornecidas as maiores emissões do setor agropecuário. Entretanto, é importante salientar que, com o crescimento das atividades florestais, bem como da melhoria da tecnologia da pecuária, a tendência é de que estas emissões sejam cada vez menores.

Ao se analisar os impactos da ação humana nas mudanças climáticas, a agropecuária é mencionada como uma das principais causas do desmatamento da floresta tropical, contribuindo para o aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEE), conforme relato de Manzatto et al. (2018).

As emissões do setor, cerca de 31% do total nacional, são oriundas do processo produtivo, ou emissões de gás metano na pecuária, liberação de carbono pelas práticas de manejo do solo e outras. Se, por um lado, essas externalidades negativas geradas pela agropecuária podem fragilizar a imagem do setor, por outro lado representam uma excelente oportunidade para reduzir emissões ou mesmo recompor os estoques de carbono que foram liberados ao longo das últimas décadas. Esta recomposição deverá ser contabilizada para o cumprimento dos compromissos internacionais de redução de emissões que o Brasil assumiu voluntariamente por meio do Plano ABC e que foram ratificados e ampliados em 2016 na COP-21, em Paris. Dessa forma, cada vez mais os impactos do aquecimento global no Brasil serão verificados por meio de métricas que façam o balanço entre emissão/remoção. Os resultados preliminares do Plano ABC, onde o componente florestal é um dos mais importantes, mostra que é possível reduzir as emissões do setor agropecuário, com remoção de carbono da atmosfera e fixação

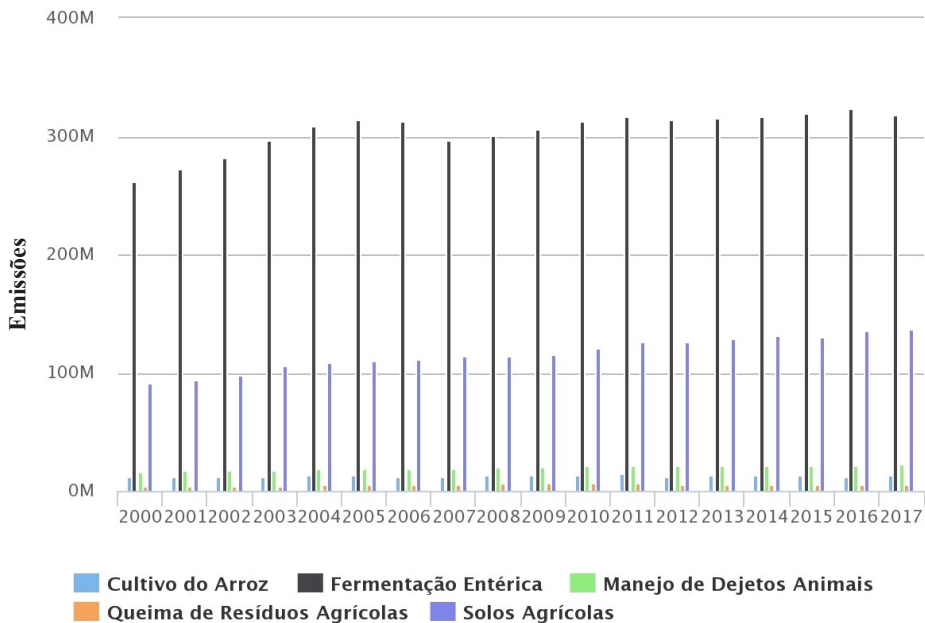


Figura 12. Indicação das principais fontes de emissão na agricultura.
Fonte: Seeg Brasil (2019).

deste carbono no solo, ou imobilizado na madeira. Segundo o SEEG Brasil (2019), as remoções por reflorestamento/silvicultura atingem em torno de 100 milhões de $\text{CO}_2\text{eq/ano}$, desde 2003. O potencial de remoção de carbono das florestas plantadas é muito grande. Moreira (2010) encontrou em solos de textura média, um estoque de carbono em áreas reflorestadas, cômoda ordem de 32,4 tC/ha para teca (*Tectona grandis*), 31,6 tC/ha em um consórcio de ipê-rosa e feijó e 45,6 tC/ha no plantio de ipê-rosa e caixeta. Gatto et al. (2010), na região centro-leste do estado de Minas Gerais, em plantações de eucalipto com 84 meses de idade, encontrou estoque variando de 251 tC/ha a 186 tC/ha. Silva et al. (2015), fazendo a partição nos diversos componentes da biomassa aérea do eucalipto, encontrou 38,9 kgC/árvore. Esses resultados são significativos e mostram o grande potencial de remoção de carbono da atmosfera e imobilização de carbono da madeira, reduzindo as emissões de GEE em reflorestamentos comerciais.

Principais riscos climáticos para a cultura do eucalipto

Temperatura

As altas temperaturas observadas nos Trópicos favorecem a produção de eucalipto. Durante o inverno, as plantas não entram no processo de dormência, como ocorre nas latitudes elevadas, pois raramente atingem valores médios diários abaixo da temperatura basal do eucalipto.

Dentro da amplitude térmica em que a fotossíntese ocorre, três variáveis podem ser definidas como prioritárias para o desenvolvimento do eucalipto: temperatura mínima ou basal inferior (Tbi), temperatura ótima (Tot) e temperatura máxima ou basal superior (Tbs). Para além desses limites, deve-se mencionar as temperaturas crítica ou letal inferior (Tci) e superior (Tcs).

Segundo Almeida et al. (2004), a temperatura ótima para fotossíntese seria 25 °C, com limite inferior de 8 °C e limite superior de 36 °C, para produção de eucalipto no norte do estado do Espírito Santo.

Para um grande número de espécies vegetais, a temperatura crítica inferior é aquela em que ocorre o congelamento e, conseqüentemente, morte das células vegetais. Porém, o ponto de congelamento varia de acordo com a espécie, dependendo da sua capacidade de produzir proteínas anticongelamento e açúcares crioprotetores. Plantas lenhosas, em particular, possuem maior resistência ao congelamento devido a mecanismos protetores como a desidratação.

Floriani et al. (2013), avaliando o efeito da aclimação sobre a tolerância ao frio em espécies de eucalipto, determinaram a temperatura letal 50% (TL₅₀) para mudas não aclimatadas em -4,5 °C para *Eucalyptus benthamii*, -3,9 °C para *Eucalyptus dunnii*, e -2,0 °C para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*.

Portanto, dependendo da espécie considerada, a temperatura letal crítica inferior pode ser diferente. Em análises de ocorrência de temperaturas baixas, normalmente, considera-se como referência a temperatura de relva, ou seja, a temperatura mais próxima ao solo. Ao nível do solo ou da cultura quando se trata de espécies anuais de baixo porte, a temperatura chega a ser, geralmente, 2 graus menor do que a registrada no abrigo meteorológico (Sentelhas et al., 1999). Porém, isso não corresponde à realidade do eucalipto, a não ser no caso de mudas recém-plantadas, quando ainda estão pequenas e mais próximas ao nível do solo.

Segundo Dibax (2007), as árvores de eucalipto afetadas por temperaturas congelantes apresentam vários danos e, quando observadas à distância, possuem um aspecto de queima ou bronzeamento da folhagem. Higa et al. (1994) citam que, além de danos diretos, como morte total ou parcial da copa, até a morte plena da planta, os danos

indiretos, que são os mais frequente, não apenas podem restringir o potencial de crescimento das plantas, como também podem contribuir para a suscetibilidade à infecção por patógenos e, até mesmo, inviabilizar povoamentos comerciais de eucaliptos.

Com a expansão das áreas de plantio de eucalipto na região Sul do País, a escolha de material genético resistente à geada é um grande desafio. Cauvin e Potts (1991) realizaram um estudo na França, utilizando mais de 300 diferentes clones de eucalipto, mostrando que o material genético com maior resistência à geada é *E. dunnii*. Higa et al. (1997), em estudo realizado em Campo do Tenente, PR, classificaram a espécie como uma das melhores do gênero, em crescimento e resistência a injúrias causadas pela geada, com desempenho similar ao de *E. viminalis* já testado nestas condições.

Nesse contexto, para a avaliação dos riscos climáticos de temperatura para o eucalipto, alguns limites de referência podem ser utilizados, conforme especificado na Tabela 3.

Tabela 3. Temperaturas cardinais consideradas para avaliação de potencial e riscos climáticos em cultivos de *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla* e do híbrido “urograndis” (*E. urophylla* x *E. grandis*).

Tamanho da planta	Temperatura cardinal (°C)				
	Tci	Tbi	Tot	Tbs	Tes
Mudas e plantas novas <50 cm	0	8	25	36	40
Planta >50 cm altura	-2	8	25	36	40

Chuva (máxima, mínima e média)

Nos Trópicos, a disponibilidade hídrica de uma região é uma das características climáticas mais importantes para o crescimento de plantas. Ao contrário dos demais elementos meteorológicos, a chuva é muito mais variável, constituindo-se no principal fator determinante da produtividade.

Além de se conhecer o total anual, é de grande importância saber a distribuição das chuvas ao longo do ano. Muitas vezes, mesmo sendo os totais anuais maiores que a média histórica, as precipitações pluviiais ocorrem concentradas em poucos eventos, favorecendo a ocorrência do escoamento superficial e a percolação profunda da água no solo. Em casos extremos, o excesso de chuvas pode provocar prejuízos consideráveis decorrentes da erosão superficial do solo. Dependendo da intensidade e tamanho das plantas, a erosão pode provocar desde uma simples exposição de raízes até a perda de plantas e falhas de plantio.

Por outro lado, em outros meses do mesmo ano, podem não ocorrer chuvas suficientes para repor a água no solo, causando, assim, deficiência hídrica.

Tanto a falta quanto o excesso de chuva podem ser prejudiciais. O eucalipto submetido ao excesso de água, decorrente da alta pluviosidade, pode apresentar anomalias como a necrose foliar, a presença da seca de ponteiros nos galhos e na haste

principal, brotações adventícias ao longo do fuste e dos galhos, lançamento de folhas com limbo afilado, deformado e com sintomas de deficiência nutricional, em árvores adultas, além de obstrução com tiloses em vasos do xilema da haste, do lenho e das raízes. A doença do ponteiro seco, por exemplo, tem sido relacionada tanto ao déficit, quanto ao excesso hídrico, indicando que existe relação entre esta doença e o regime hídrico local (Maschio et al., 2000).

A forma mais adequada de se avaliar a disponibilidade de água para um cultivo é por meio do balanço hídrico. No entanto, mesmo sem o desenvolvimento mais elaborado do balanço hídrico, é possível estabelecer alguns indicadores mais simples e diretos a partir da pluviosidade de um local (Tabela 4).

Tabela 4. Valores de referência estabelecidos para a implantação de povoamentos de produção de eucalipto, para as espécies trabalhadas.

Espécie	Pluviosidade anual favorável		Evento extremo de chuva diária
	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Máxima (mm)
<i>Eucalyptus grandis</i> *	1000	1800	100
<i>Eucalyptus urophylla</i> *	1000	1500	100

Fonte: Adaptado de Ribeiro et al. (2009).

Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração é o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera, por evaporação da água do solo e por transpiração das plantas. A evapotranspiração de referência (ET_o) é a quantidade de água que seria evaporada e transpirada por uma vegetação em condições padronizadas e sem restrição hídrica. Dessa forma, a ETP é limitada apenas pelo balanço vertical de energia, ou seja, pelas condições do ambiente local (Pereira et al., 2002).

Logo, a ET_o é o valor indicativo da demanda evapotranspirativa da atmosfera em um dado local, num dado período.

Se, por um lado, a chuva representa a fonte principal ou oferta hídrica para as culturas agrícolas, por outro a evapotranspiração representa o consumo ou a demanda hídrica. A diferença entre a oferta e demanda é que definirá a disponibilidade hídrica para a cultura, fator primordial na definição da produtividade.

Em áreas extensas ou em períodos passados, como em séries de dados meteorológicos, a maneira mais prática de se estimar a disponibilidade ou deficiência hídrica para uma cultura é por meio do cálculo do balanço hídrico do solo.

Porém, a despeito das incertezas ou eventuais dificuldades para o levantamento de parâmetros necessários para um balanço hídrico preciso, a evapotranspiração pura e simples acaba se apresentando como um indicador muito mais simples e prático para

a identificação de períodos críticos de demanda ou consumo hídrico. Em períodos críticos com ETo já elevada ou em elevação, com ausência ou escassez de chuvas, é fundamental a existência de reserva hídrica suficiente nos solos. Em mudas jovens de eucalipto, com sistema radicular ainda pouco desenvolvido, a reserva hídrica do solo esgota-se rapidamente em condições de elevada demanda com ausência de chuvas, sendo necessário irrigação suplementar ou de “salvamento” para garantir a sobrevivência das mudas ao período adverso.

Dessa forma, a ETo é um importante indicador simples e prático para avaliar o impacto de mudanças climáticas na demanda hídrica de um local.

Para as análises deste estudo orientado à quantificação de condições de estresse vegetal e risco de produção, no presente e em cenários futuros, serão consideradas as categorias de evapotranspiração alta e muito alta, conforme identificadas na Tabela 5.

Tabela 5. Classificação de intervalos de evapotranspiração de referência para as análises de frequência e risco (Monteiro, 2009).

ETo	ETo (mm/dia)	Impacto esperado
Baixa	0 a 3	<ul style="list-style-type: none"> Baixa demanda hídrica, normalmente associada a dias nublados e, ou com baixas temperaturas Necessidades da planta são atendidas mesmo com armazenamento baixo. Não representa risco imediato.
Média	3 a 5	<ul style="list-style-type: none"> Média demanda hídrica, normalmente associada a dias parcialmente nublados e, ou com temperaturas moderadas Necessidades da planta podem ser supridas com armazenamento médio e alto Não representa risco imediato
Alta	5 a 7	<ul style="list-style-type: none"> Alta demanda hídrica, normalmente associada a dias ensolarados e altas temperaturas Condição de alta demanda hídrica desfavorável para a maioria dos cultivos O eucalipto, por ser uma espécie de excelente controle estomático, é menos afetado e terá suas necessidades de água supridas em solo com armazenamento elevado As plantas podem apresentar sintomas de deficiência nas horas mais quentes do dia, mesmo com elevado armazenamento, principalmente mudas Essa intensidade de ETo normalmente ocorre depois de uma sequência de vários dias sem chuva, e se intensificam a medida que a umidade do ambiente decresce e as temperaturas aumentam progressivamente Maior respiração com menor fotossíntese, resultando em redução ou parada temporária do crescimento Condição de risco alto para mudas recém-plantadas

Continua...

Tabela 5. Continuação....

ETo	ETo (mm/dia)	Impacto esperado
Muito alta	>7	<ul style="list-style-type: none"> • Condição muito desfavorável para agricultura de modo geral, mesmo para as culturas mais resistentes a altas temperaturas • Alta demanda hídrica, normalmente associada a dias ensolarados, altas temperaturas e umidades do ar muito baixas e, ou vento intenso • O eucalipto, por ser uma espécie de excelente controle estomático, é menos afetado, perderá menos água. As suas necessidades de água não são supridas nem em solo com armazenamento elevado. • As plantas apresentam evidentes sintomas de deficiência nas horas mais quentes do dia, mesmo com elevado armazenamento, principalmente mudas. • Essa intensidade de ETo só ocorre depois de uma sequência de muitos dias sem chuva, resultado de um processo de agravamento à medida que a umidade do ambiente decresce e as temperaturas aumentam progressivamente. • Maior respiração com menor fotossíntese, resultando em redução ou parada temporária do crescimento. • Comum ocorrer ressecamento e morte de ponteiros muito tenros em mudas jovens. • Condição de altíssimo risco para mudas recém-plantadas.

Disponibilidade hídrica e déficit hídrico para eucalipto

De acordo com Fageria (1992), citado por Hoogenboom (2000), ao redor de 80% da variabilidade da produção agrícola no mundo deve-se à variabilidade das condições meteorológicas durante o ciclo de cultivo, especialmente para as culturas de sequeiro, já que os agricultores não podem exercer nenhum controle sobre tais fenômenos naturais. De acordo com Ray et al. (2015), em grande parte das principais regiões mundiais de produção de alimentos, mais de 60% da variabilidade da produção podem ser explicados pela variabilidade meteorológica interanual. E, no Brasil, pode chegar a mais de 75%, dependendo da cultura e da região.

No Brasil, a maior parte da área agrícola está situada em regiões sujeitas a restrições hídricas mais ou menos intensas, de forma que é a principal causa da variabilidade da produção agrícola nacional, inclusive a do eucalipto. Mesmo os efeitos deletérios diretos causados por temperatura elevadas estão, até o presente, normalmente associadas aos períodos mais longos de estiagem.

Nesse contexto, a deficiência hídrica se apresenta como o principal fator de risco para a produção do eucalipto no Brasil

Para caracterizar e quantificar esse risco, é necessário levar em conta algumas características do eucalipto que lhes conferem melhor adaptação a situações de

restrição hídrica, especialmente nos híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*, do que na maioria das outras espécies cultivadas desse Gênero.

Outra característica importante é o sistema radicular que, em solos favoráveis, consegue alcançar grandes profundidades. Almeida e Soares (2003) compararam o uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e em vegetação nativa da Mata Atlântica, e concluíram, considerando o ciclo de crescimento de sete anos, que o eucalipto pode consumir menos água que a mata nativa, na região estudada. Nos anos em que a precipitação pluviométrica aproximou-se da média histórica, ocorreu o equilíbrio da evapotranspiração para os dois ecossistemas. E, nos anos em que a precipitação pluviométrica foi inferior à média histórica, a vegetação da Mata Atlântica apresentou taxas de evapotranspiração superiores àquelas do eucalipto. No entanto, esta característica em particular nem sempre se manifesta plenamente devido às limitações dos solos. Solos com impedimentos físicos ou químicos podem limitar severamente o desenvolvimento radicular em profundidades maiores.

Esses aspectos condicionam a resposta do eucalipto às situações de alta e baixa demanda evapotranspirativa, alta e baixa oferta hídrica, e definem seu consumo hídrico. Sacramento Neto (2001) obteve, para plantios com um e dois anos de idade, taxas médias de evapotranspiração real (ET_r) aproximadamente iguais 5,0 mm d⁻¹ e 1,4 mm d⁻¹, nos períodos úmidos e secos do ano, respectivamente. Neves (2000) determinou, para plantios adultos, com 10 anos de idade, ET_r aproximada de 5,7 mm d⁻¹ e 2,3 mm d⁻¹, nos períodos úmido e seco do ano, respectivamente.

Essas respostas podem ser adequadamente representadas pelo balanço hídrico, permitindo produzir indicadores objetivos de favorabilidade ou desfavorabilidade do ambiente, no presente ou em cenários futuros. Um dos indicadores mais utilizados do estado hídrico para um certo local e cultura é o déficit hídrico (DH), por ser facilmente relacionável com condições limítrofes ou críticas. Por exemplo, o déficit hídrico derivado do balanço hídrico climatológico tem sido utilizado como indicador para a escolha de materiais genéticos de eucalipto. Gonçalves (2014), considera regiões de DH elevado aquelas com valor anual entre 100 mm/ano e 200 mm/ano, recomendando espécies ou híbridos de média à alta tolerância à seca. E, regiões com déficit entre 200 mm/ano e 400 mm/ano são consideradas de DH muito elevado, recomendando apenas espécies ou híbridos de alta tolerância à seca.

Para as análises de frequência de ocorrência de condições de estresse e risco de produção, no período base e em cenários climáticos futuros, serão consideradas as categorias de déficit hídrico médio, alto e muito alto.

Modelagem de crescimento do eucalipto a partir de parâmetros climáticos

Para a determinação do impacto na produtividade da cultura de eucalipto, um indicador que pode ser utilizado é o ISNA (índice de satisfação de necessidade de água). Este índice é o principal indicador para avaliação dos riscos hídricos utilizado no Zoneamento Agrícola de Risco Climático, aplicado pelo Ministério da Agricultura há mais de 25 anos, nas regras do Proagro. Para efeito de simulação, foram consideradas quatro regiões:

- NE, com IMA (Incremento Médio Anual) de $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Região A).
- Centro-Oeste e litorânea, com IMA de $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Regiões B e C).
- Sul, com $55 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Região D).

A avaliação do impacto das mudanças do clima é feita utilizando as projeções do Modelo HADgem2-ES para os períodos de 2010-2020, 2020-2030 e 2030-2040 para as quatro regiões, tendo como referência o período de 1980 a 2010 (considerado aqui como a normal climatológica). Um primeiro passo é verificar a relação entre os dados observados e os dados gerados pelo modelo. Comparações feitas em diversas regiões do Brasil mostram a acurácia do modelo HadGem2-ES e a incerteza dos dados, conforme ilustrado na Figura 13.

Devido à inexistência no Brasil de séries históricas de 30 anos, em quantidade e qualidade suficientes, de umidade relativa, saldo de radiação e velocidade do vento, a evapotranspiração de referência (ET_o) não pode ser estimada pelo método de Penman-Monteith, considerado o mais preciso e exato e recomendado pela FAO como método

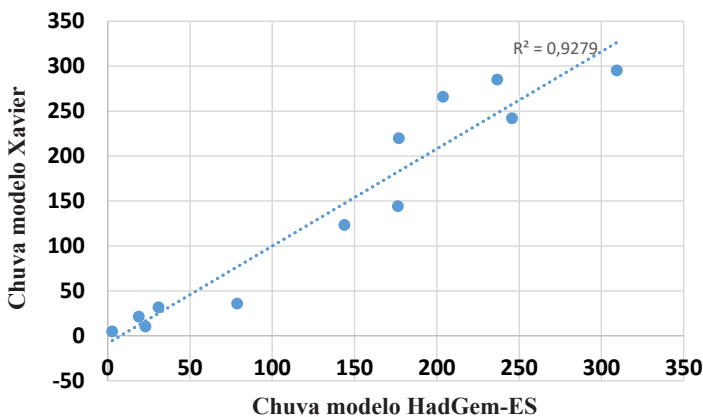


Figura 13. Correlação entre as chuvas observadas e estimadas pelo modelo HadGem2-ES, no cenário IPCC RCP 8.5 em Querência, MT.

preferencial (Allen et al., 1998). Os dados de ETo foram estimados a partir das temperaturas mínimas e máximas diárias, pela equação de Hargreaves e Samani (1985), com parametrização otimizada para as condições climáticas das regiões indicadas (Eq. 1), conforme demonstrado em Monteiro et al. (2017). Dos métodos que utilizam apenas a temperatura máxima e mínima, o de Hargreaves e Samani apresenta o melhor desempenho, quando calibrado para as condições locais.

$$ETo = 0,0018 * Qo * ((Tmax-Tmin)^{0,83}) * (Tmed) - 0,5 \quad \text{[Equação 1]}$$

Em que:

ETo = evapotranspiração de referência.

Qo = radiação no topo da atmosfera.

Tmax = temperatura máxima do ar.

Tmin = temperatura mínima e Tmed é a temperatura média.

A partir dos dados de evapotranspiração potencial, chuva e dos parâmetros do eucalipto, foi calculado o balanço hídrico sequencial da cultura pelo método de Thorntwaite e Mather (1955), que permite quantificar as variações de água no solo em função da oferta e demanda hídrica no ambiente de cultivo.

O balanço hídrico é calculado para a condição da cultura com dossel completamente formado, o que ocorre a partir de 12 meses de idade. Os parâmetros de cultura necessários para o cálculo do balanço hídrico são a curva de coeficiente de cultura (Kc) ao longo do ano e a CAD dada em função de um solo de média capacidade de armazenamento e do sistema radicular profundo do eucalipto.

Alves et al. (2013), avaliando a disponibilidade e a demanda hídrica na fase inicial de desenvolvimento do eucalipto, valores médios de 0,57 para coeficiente de evaporação da água do solo (Ke); 0,13 para coeficiente basal da cultura (Kcb) e 0,70 para coeficiente de cultura único (Kc); na fase de média de desenvolvimento da cultura, os valores foram 0,01; 0,81 e 0,82 para Ke, Kcb e Kc, respectivamente. Em plantios com um e dois anos de idade, Sacramento Neto (2001) obteve taxas médias de evapotranspiração real (ETr) aproximadamente iguais, sendo 5,0 mm d⁻¹ nos períodos úmidos e 1,4 mm d⁻¹ nos períodos secos do ano. Em plantios adultos com dez anos de idade, Neves (2000) determinou ETr aproximada de 5,7 mm d⁻¹ e 2,3 mm d⁻¹, nos períodos úmido e seco do ano, respectivamente.

Considerando os resultados acima e o eficiente controle estomático do eucalipto (Almeida; Soares, 2003), seria apropriado admitir um valor médio de Kc entre 0,8 e 0,9 para plantios de eucaliptos com dossel plenamente formado. Para o período do ano mais favorável, com crescimento ativo adotou-se o valor 0,9 e para os meses mais secos do ano, com crescimento reduzido, adotou-se 0,8. Para os meses de condição intermediária, adotou-se o valor 0,85.

Outro parâmetro fundamental a ser estimado é a capacidade de água disponível à cultura, considerando o tipo de solo e a profundidade do sistema radicular. Almeida e Soares (2003) avaliaram a quantidade de água disponível no solo em uma plantação de eucalipto adulto até a profundidade de 2,5 m. Nessa camada, a curva de variação de água disponível no solo raramente foi superior a 160 mm, indicando um provável referencial para a capacidade máxima de armazenamento do solo.

Apesar das raízes do eucalipto alcançarem profundidades até maiores que dois metros, a quantidade de raízes e o volume de solo explorado diminui drasticamente com a profundidade. A porosidade total do solo, a profundidade a ser aerada e o nível de consumo de oxigênio influem significativamente na porosidade de aeração mínima necessária para uma oxigenação completa de um sistema radicular (Jong Van Lier, 2001). Dessa forma, não se pode adotar uma correspondência direta da profundidade radicular com o volume de solo efetivamente explorado pelas raízes e, conseqüentemente, a CAD.

Assim, apesar de alcançar maiores profundidades, o sistema radicular não cresce tão profusamente quanto na superfície e, portanto, não pode explorar todo o volume de solo. Dessa forma, em culturas de sistema radicular muito profundo, não deve ocorrer muita variação de CAD em função da textura do solo, como ocorre em culturas de sistema radicular raso. Isso ocorre porque, apesar do menor armazenamento de um solo mais arenoso, sua maior aeração permitiria, nas camadas profundas, um sistema radicular mais denso do que seria possível em um solo mais argiloso e menos aerado (Costello et al., 1991; Bartholomeus et al., 2008).

Porém, a questão da profundidade viável do solo permanece como fator preponderante. Por isso, a aferição das profundidades viáveis do solo, ou seja, sem impedimentos físicos ou químicos, é fundamental para uma correta estimativa de CAD para eucalipto.

A variação de CAD em função da textura do solo e da profundidade não ocorre de forma linear e direta como ocorre em culturas com sistema radicular raso. Isso ocorre porque, apesar do menor armazenamento de um solo mais arenoso, sua maior aeração permitiria nas camadas profundas um sistema radicular mais denso do que permitiria um solo mais argiloso e menos aerado.

O eucalipto apresenta uma densidade radicular elevada nas camadas superficiais do solo. No caso específico do eucalipto, para determinação da CAD, além de se considerar que 80% das raízes ativas estão até 30 cm de profundidade, foi determinada a CAD para 1,5 m a 2,0 m.

A partir da distribuição radicular no perfil do solo e da densidade de raízes presente em cada camada, é possível estimar a fração útil da água armazenada, para o cálculo da efetiva capacidade de água disponível (Yu et al., 2007; Besharat et al., 2010). Dessa forma, é possível ajustar um fator de ponderação para a fração útil de água no solo, em função da distribuição radicular. Considerou-se 100% de aproveitamento para densidade radicular acima de 0,30 g/dm³, com redução proporcional para densidades

menores. Assim, para eucalipto em solos arenosos de baixa capacidade de armazenamento (solo tipo 1), pode-se considerar uma CAD de 105 mm; em solos de média capacidade de armazenamento, geralmente siltosos (solos tipo 2), uma CAD de 135 mm e em solos de alta capacidade de armazenamento, siltosos ou argilosos bem estruturados (solos tipo 3), uma CAD de 150 mm.

Com esse conjunto de parâmetros, é possível estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) que define a demanda atmosférica; a evapotranspiração potencial da cultura (ET_c); a evapotranspiração real da cultura (ET_r); o índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) dado pela relação ET_r/ET_c e o déficit hídrico da cultura (DEF). Essas variáveis são calculadas para todas as séries completas, para o período de referência 1981 a 2010, para o cenário e para os cenários HadGEN2-ES de 2011-2020, 2021-2030 e de 2031-2040.

Com os resultados mensais, para cada variável, são definidos os balanços hídricos e determinados os ISNAS anuais, para as regiões A, B, C e D.

Aplicando-se, então, as indicações genéricas, cujos IMAs anuais são 30 m³/ha, 40 m³/ha, e 55 m³/ha para as regiões A, B, C e D, e considerando que o ISNA mais elevado seria o correspondente ao maior IMA, o impacto na produtividade do eucalipto para as quatro regiões foi calculado para solos de CADs diferentes. Para efeito demonstrativo, são apresentados os resultados do solo tipo 3 com CAD de 150 mm (Tabela 6).

Tabela 6. Valores dos IMAs ajustados em função da variação dos ISNAs do solo tipo 2, considerando os IMAs anuais de 30 m³/ha, 40 m³/ha e 55 m³/ha, respectivamente, para as regiões A, B, C e D.

Ano	Região			
	A	B	C	D
1980	27,3	35,9	34,2	57,0
1981	24,3	35,2	33,1	49,0
1982	23,9	31,0	36,6	53,8
1983	24,2	35,0	39,1	56,5
1984	27,7	36,2	32,8	55,0
1985	31,2	32,5	28,9	44,5
1986	30,1	27,5	35,0	54,6
1987	22,2	30,9	37,4	55,0
1988	28,7	30,2	31,5	49,2
1989	30,0	27,9	36,7	56,9
1990	26,1	29,8	38,6	57,1
1991	24,5	40,2	28,4	53,6
1992	20,1	38,0	38,9	55,9
1993	26,9	27,1	28,8	56,1
1994	28,6	35,8	29,9	53,4
1995	29,3	35,8	30,7	54,9
1996	27,9	28,3	37,0	55,1
1997	25,9	32,1	34,8	53,9
1998	25,2	25,7	36,8	56,1
1999	28,8	33,1	29,4	53,6
2000	28,4	36,4	33,8	54,9
2001	26,6	32,8	37,3	56,9
2002	26,7	34,5	29,5	54,5
2003	27,3	22,4	34,2	53,5
2004	26,2	37,0	33,8	54,6
2005	25,8	38,3	32,5	53,7
2006	26,9	33,0	32,5	48,8
2007	24,4	27,5	29,3	51,9
2008	27,1	31,3	32,0	55,3
2009	27,4	35,6	39,9	55,0
2010	27,4	31,5	38,7	55,7
2015	25,6	24,8	31,7	55,5
2025	25,3	23,4	29,9	55,7
2035	24,4	22,2	28,2	55,2
Médio	26,5	31,7	33,6	54,2
Máximo	31,2	40,2	39,9	57,1
Mínimo	20,1	22,2	28,2	44,5

A variação temporal do IMA para o período 1980-2035, considerando o impacto na produtividade do eucalipto em função do aumento de temperatura e da variação de chuva, foi determinada pelo Modelo HadGem2-ES, nos períodos 1981-2010, 2011-2020, 2021-2030 e 2031-2040, para solos tipo 2 (Figura 14).

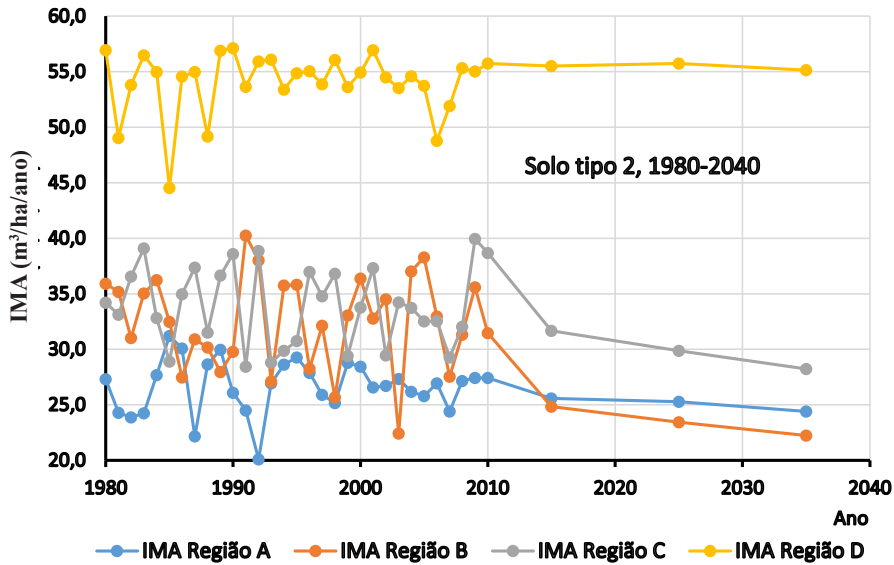


Figura 14. Variação temporal dos IMAs ajustados, considerando o impacto do aumento de temperatura e da variação de chuva pelo Modelo HadGem2-ES, na produtividade do eucalipto, nos períodos 1981-2010, 2011-2020, 2021-2030 e 2031-2040, para solos tipo 2 (textura média).

Analisando os dados da Figura 14, observa-se um decréscimo do IMA (Incremento Médio Anual) até o ano 2014, exceto na região D. O fato é que se a temperatura aumentar, haverá um aumento na evapotranspiração da cultura, que provocará uma redução do ISNA e, conseqüentemente, reduzirá o potencial de crescimento, indicado pelo IMA.

A partir dos dados de IMA e incremento corrente anual (ICA) e de produção comercial cedidos pela empresa Klabin foi possível construir as curvas de crescimento e as relações com o ISNA em um município específico.

Na Figura 15, observa-se que o máximo ICA ocorre entre as idades de 2,5 e 4,5 anos, dependendo do genótipo avaliado. Alguns clones apresentam pico de crescimento mais precocemente, enquanto outros mais tardiamente.

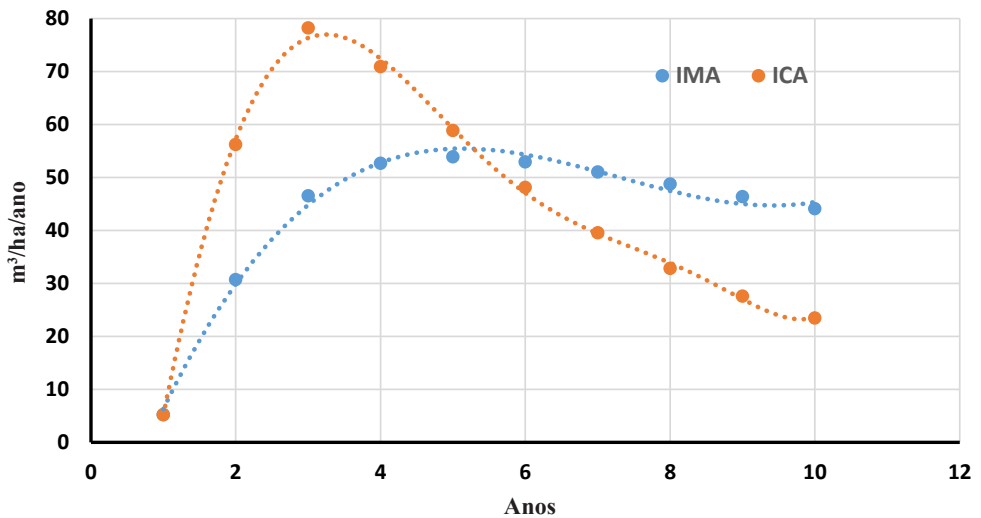


Figura 15. Curvas ajustadas de incremento corrente anual (ICA) e Incremento médio anual (IMA) de dois genótipos de eucalipto, no período de 2005 a 2015.

A partir de parâmetros meteorológicos e de dados de campo disponibilizados pela empresa Klabin, foi possível calcular o IMA e o ISNA para os sete primeiros anos da cultura do eucalipto estabelecido em um município com elevada produção comercial (Tabela 7).

Calculado o ISNA para este período, foi ajustada a curva de crescimento em função do ISNA, ou seja, dado um determinado ISNA, qual o valor de IMA estimado pelo modelo. O cálculo para determinação do ICA máximo foi até o sétimo ano, considerado como o principal ano de corte. A relação entre o ISNA e o IMA é apresentada na Figura 16, na qual se observa que o ISNA explica 93% da variância do IMA, ou seja, uma boa relação entre IMA observado e ISNA estimado.

Tabela 7. Variação de IMA e ISNA, após ajuste de curvas, nos primeiros sete anos de cultura de eucalipto.

Ano	IMA (m³/ha/ano)	ISNA
1º	5	0,13
2º	31	0,30
3º	47	0,38
4º	53	0,52
5º	54	0,73
6º	53	0,73
7º	51	0,69

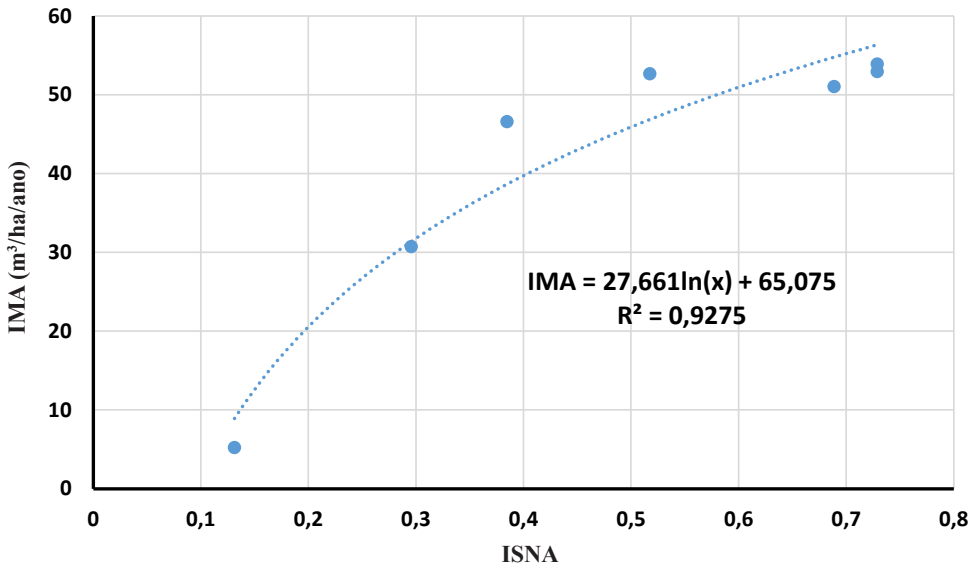


Figura 16. Valor de IMA ajustado em função do ISNA, para o período 2005 a 2015.

Distribuição espacial de áreas vulneráveis à redução da produtividade do eucalipto no Brasil

Na Figura 17, é apresentada a variação da deficiência hídrica com evolução temporal de 1988-2015, 2005 a 2015, 2021 a 2030 e 2031 a 2040.

Dessa maneira, espera-se que as melhores condições de crescimento do eucalipto, nos próximos 20 anos, irão ocorrer nas regiões indicadas pela cor verde (Figura 17), condições intermediárias e marginais nas regiões indicadas em laranja. Para reverter essa situação e ampliar as áreas propícias para o cultivo do eucalipto, será necessário reduzir as emissões de gases de efeito estufa ou buscar clones mais tolerantes à deficiência hídrica.

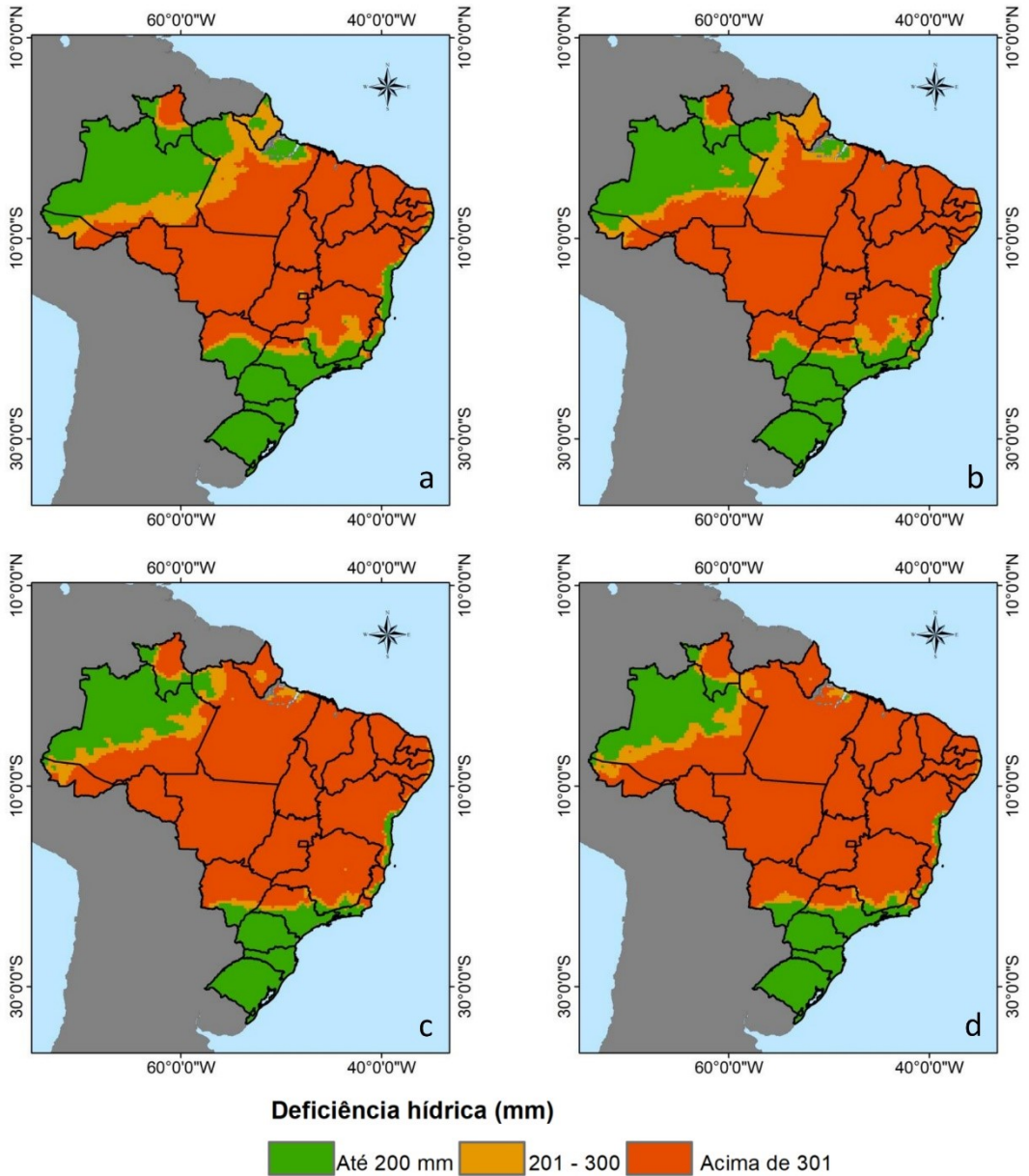


Figura 17. Mapa da deficiência hídrica, determinada pelo balanço hídrico climatológico, (método de Thornthwaite), para os períodos a) 1980-2015 b) 2005-2015 c) 2021-2030 d) 2031-2040.

Conclusões

- Os resultados dos modelos de simulação do Balanço hídrico futuro no Brasil indicam um aumento da deficiência hídrica na direção nordeste-sudoeste, com valores acima da deficiência limite para a cultura do eucalipto.
- Foi observada uma boa correlação entre as curvas de crescimento do IMA e do ISNA para o eucalipto, que permitem fazer inferências futuras sobre a produtividade da cultura, na condição de se ter uma série mínima de valores observados em campo.
- A região Sul do Brasil é a menos vulnerável para a cultura, mesmo utilizando o cenário mais pessimista de Aquecimento global, que é o RCP8.5
- Sugere-se fortemente que tais simulações sejam refeitas com os modelos do CIMP6, para estarem compatíveis com o relatório AR6 do IPCC.

Agradecimentos

À empresa Klabin, pelo apoio e discussões técnicas que orientaram parte deste trabalho e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas - INCT-MC (CHAMADA INCT – MCTI/CNPq/CAPES/FAPs nº 16/2014); ao CNPq, Capes, Fapesp e à Rede Clima - Subrede Clima e Agricultura do MCTIC pelo apoio financeiro e tecnológico.

Referências

- ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 179-195, 2004.
- ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO. Irrigation and drainage paper, 56).
- ALVES, M. E. B.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; NEVES, J. C. L. Estimate of the crop coefficient for *Eucalyptus* cultivated under irrigation during initial growth. **Cerne**, v. 19, n. 2, p. 247-253, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000200008>.
- BARTHOLOMEUS, R. P.; WITTE, J. P. M.; VAN BODEGOM, P. M.; VAN DAM, J. C.; AERTS, R. Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: substituting the Feddes-function by a process-based model. **Journal of Hydrology**, v. 360, p. 147-165, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.029>.

BESHARAT, S.; NAZEMI, A. H.; SADRADDINI, A. A. Parametric modeling of root length density and root water uptake in unsaturated soil. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 34, n. 5, p. 439-449, 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais as mudanças do clima no Brasil**. Brasília, DF, 2016a. 590 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Terceira comunicação nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**: sumário executivo. Brasília, DF, 2016b. 45 p.

CAMARGO, A. P. de. **Balanco hídrico no Estado de São Paulo**. 3. ed. São Paulo: Instituto Agrônômico, 1971. 24 p. (IA. Boletim, 116).

CAUVIN, B.; POTTS, B. Selection for extreme frost resistance. In: SYMPOSIUM INTENSIVE FORESTRY THE ROLE OF EUCALYPTS, 1991, Durban. **Proceedings** [...]. Wien: IUFRO, 1991. p. 209-220. Disponível em: http://eprints.utas.edu.au/3343/1/Cauvin_and_Potts_1991_IUFRO.pdf. Acesso em: 1º set. 2019.

CIAIS, P.; SABINE, C.; BALA, G.; BOPP, L.; BROVKIN, V.; CANADELL, J.; CHHABRA, A.; DEFRIES, R.; GALLOWAY, J.; HEIMANN, M.; JONES, C.; LE QUÉRÉ, C.; MYNENI, R. B.; PIAO, S.; THORNTON, P. Carbon and other biogeochemical cycles. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. -K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (ed.). **Climate change 2013: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

COOK, J. **Guia científico do ceticismo quanto ao aquecimento global**. 2010. 16 p. Disponível em: https://skepticalscience.com/docs/Guide_Skepticism_Portuguese.pdf. Acesso em: 1º set. 2019.

COSTELLO, L. R.; MACDONALD, J. D.; JACOBS, K. A. Soil aeration and tree health: correlating soil oxygen measurements with the decline of established oaks. In: STANDIFORD, R. B. (coord.). **Proceedings of the symposium on oak woodlands and hardwood rangeland management, 1990**. Berkeley, CA: Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, 1991. p. 295-299. (General technical report, PSW-GTR-126).

CO1. **Daily CO2**. 2020. Disponível em: <https://www.co2.earth/daily-co2>. Acesso em: 2 set. 2019.

CRONIN, T. N. **Paleoclimates: understanding climate change past and present**. New York: Columbia University Press, 2010.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542007000600039>.

DIBAX, R. **Transformação e expressão do gene PC5SF129-A em *Eucalytus saligna***. 2007. 131 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

- EDENHOFER, O.; PICHS-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; MINX, J. C.; FARAHANI, E.; KADNER, S.; SEYBOTH, K.; ADLER, A.; BAUM, I.; BRUNNER, S.; EICKEMEIER, P.; KRIEMANN, B.; SAVOLAINEN J.; SCHLÖMER, S.; STECHOW, C. von; ZWICKEL, T. (ed.). **AR5 climate change 2014: mitigation of climate change**. Cambridge: Cambridge University, 2014. Contribution of Working Group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf. Acesso em: 1º set. 2019.
- FAGERIA, N. K. **Maximizing crop yields**. New York: Marcel Dekker, 1992. 274 p. (Books in soils, plants and the environment).
- FLORIANI, M. M. P.; STEFFENS, C. A.; CHAVES, D. M.; AMARANTE, C. V. T. do; PIKART, T. G.; RIBEIRO, M. dos S. Relação entre concentrações foliares de carboidratos solúveis totais e tolerância ao frio em diferentes espécies de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 1, p. 165-174, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050988450>.
- GATTO, A.; BARROS, N. F. de; NOVAIS, R. F. de; SILVA, I. R. da; LEITE, H. G.; VILLANI, E. M. de A. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1069-1079, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000500015>.
- GHINI, R.; BETTIOL, W.; HAMADA, E. Diseases in tropical and plantation crops as affected by climate changes: current knowledge and perspectives. **Plant Pathology**, v. 60, p. 122-132, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02403.x>.
- GONÇALVES, J. L. M. Escolha de materiais genéticos de eucalipto em função do uso e das condições edafoclimáticas. In: SIMPÓSIO SOBRE TÉCNICAS DE PLANTIO E MANEJO DE EUCALYPTUS PARA USOS MÚLTIPLOS, 8., 2014, Piracicaba. **Anais [...]**. Piracicaba: Esalq: USP, 2014.
- HAMADA, E.; GONÇALVES, R. R. V.; ORSINI, J. A. M.; GHINI, R. Cenários climáticos futuros para o Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E. (ed.). **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 25-74. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/150054/1/2008CL-38.pdf>.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.
- HIGA, A. R.; GARCIA, C. H.; SANTOS, E. T. Geadas, prejuízos à atividade florestal. **Silvicultura**, v. 15, n. 58, p. 40-43, 1994.
- HIGA, R. C. V.; HIGA, A. R.; TREVISAN, R.; SOUZA, M. V. R. de. Efeitos de danos causados por geadas na sobrevivência e crescimento de *Eucalyptus viminalis* Labill. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FISILOGIA VEGETAL, 6., 1997, Belém. **Resumos..** Belém, PA: Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, 1997. p. 263.
- HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, n. 1-2, p. 137-157, 2000.
- JONG VAN LIER, Q. de. Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 233-238, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100025>.
- KERR, R. A. The tropics return to the climate systems. **Science**, v. 292, n. 5517, p. 660-661, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.292.5517.660>.

- MANZATTO, C. V.; ARAUJO, L. S.; VICENTE, L. E.; VICENTE, A. K.; PEROSA, B. B. Plataforma ABC: monitoramento da mitigação das emissões de carbono na agricultura. **Agroanalysis**, v. 38, p. 26-29, 2018.
- MASCHIO, L. M. A.; ANDRADE, F. M.; AUER, C. G. Contribuição e fatores climáticos na ocorrência da seca de ponteiros de *Eucalyptus grandis* em Arapoti-PR. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 41, p. 55-63, 2000.
- MONTEIRO, J. E. B. A.; CUADRA, S. V.; OLIVEIRA, A. F.; NAKAI, A. M.; MACIEL, R. J. S. Estimativa da evapotranspiração diária baseada apenas em temperatura. **Agrometeoros**, v. 25, n. 1, p. 227-236, 2017.
- MONTEIRO, J. E. B. A. (ed.) **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF, 2009. 530 p.
- MOREIRA, C. S. **Estoques de carbono do solo em áreas de reflorestamento: bases para projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**. 2010. Tese (Doutorado em Química na Agricultura e no Ambiente) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Curso online da ONU sobre mudanças climáticas está disponível em português**. 2017. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/curso-online-da-onu-sobre-mudancas-climaticas-esta-disponivel-em-portugues/>. Acesso em: 15 maio 2020.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.
- RAY, D. K.; GERBER, J. S.; MACDONALD, G. K.; WEST, P. C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature Communications**, v. 6, n. 5989, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>.
- RIBEIRO, A.; PAIVA, Y. G.; BAESSO, R. C. E.; ALMEIDA, A. Q. de; OLIVEIRA, A. S. de; OLIVEIRA, R. A. de; HAMAKAWA, P. J.; SILVA, M. P. Eucalipto. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. p. 409-423.
- SACRAMENTO NETO, O. B. **Balanco hídrico em plantios jovens de eucalipto na região de Belo Oriente, MG**. 2001. 77 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- SEEG Brasil. **Emissões por setor: agropecuária**. Disponível em: <http://plataforma.seeg.eco.br/sectors/agropecuaria>. Acesso em: 1º set. 2019.
- SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. R.; MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; ALFONSI, R. R.; CARAMORI, P. H.; SWART, S. **BHBRASIL: balanços hídricos climatológicos de 500 localidades brasileiras**. Piracicaba: ESALQ, 1999. 7 p.
- SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; CARVALHO, S. P. C.; PICCOLO, M. C.; RODRIGUEUZ, L. C. E. Estoque de carbono na biomassa aérea florestal em plantações comerciais de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 135-146, 2015.
- SILVA, T. G. F. da; MOURA, M. S. B. de; SÁ, I. I. S.; ZOLNIER, S.; TURCO, S. H. N.; JUSTINO, F.; CARMO, J. F. A. do; SOUZA, L. S. B. de. Impactos das mudanças climáticas na produção leiteira do estado de Pernambuco: análise para os cenários B2 e A2 do IPCC. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 4, p. 489-501, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862009000400010>.

SILVEIRA, S. S.; SOUZA FILHO, F. A.; COSTA, A. A.; CABRALA, S. L. Avaliação de desempenho dos modelos do CIMIP5 quanto a representação dos padrões de variação de precipitação no século XX sobre a região Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5.

Revista Brasileira de Meteorologia, v. 28, n. 3, p. 317-330, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862013000300008>.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p. (Climatology, v. 8, n. 1).

UNITED NATIONS. Framework Convention on Climate Change. **UNFCCC: 25 years of effort and achievement**. [2019]. Disponível em: <https://unfccc.int/timeline/>. Acesso em: 15 maio 2020.

YU, G.; ZHUANG, J.; NAKAYAMA, K.; JIN, Y. Root water uptake and profile soil water as affected by vertical root distribution. **Plant Ecology**, v. 189, p. 15–30, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11258-006-9163-y>.